

沥青路面抗裂 ——设计理论与方法

郑健龙
周志刚 著
张起森



人民交通出版社

217.02

沥青路面抗裂 ——设计理论与方法

LIQING LUMIAN KANGLIE
SHEJI LILUN YU FANGFA

郑健龙
周志刚 著
张起森

人民交通出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了沥青路面开裂机理、抗裂设计原理及其在公路工程中的应用。全书共分八章,包括:绪论,断裂力学基础,沥青路面线弹性断裂分析,沥青路面疲劳断裂分析,沥青混合料粘弹性特性测试,沥青路面温度收缩开裂粘弹性力学分析,沥青路面抗裂设计,沥青路面抗裂方法的工程应用。重点在沥青路面开裂机理分析。

本书内容翔实,系统性强。可供从事公路工程的研究人员及工程技术人员参考,也可作为有关专业研究生教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面抗裂设计理论与方法/郑健龙,周志刚,张起森编著. —北京:人民交通出版社,2003

ISBN 7-114-04591-3

I. 沥... II. ①郑... ②周... ③张... III. 沥青路面—防裂—设计 IV. U416.217.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 008751 号

沥青路面抗裂设计理论与方法

郑健龙 周志刚 张起森 编著

正文设计:彭小秋 责任校对:张莹 责任印制:张恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:444 千

2002 年 12 月 第 1 版

2003 年 7 月 第 1 版 第 2 次印刷

印数:1501—4500 册 定价:32.00 元

ISBN 7-114-04591-3

前 言

路面开裂是沥青路面的主要病害之一。由于环境温度、交通荷载等因素的影响,沥青路面中已有裂缝将会逐渐向上扩展到路表,在雨水的作用下,对路面结构造成进一步的危害,从而使道路结构逐渐丧失承载能力。如何认识沥青路面开裂机理、阻止或延缓裂缝的发展,延长沥青路面使用寿命,是世界性的难题。

关于沥青路面断裂分析及抗裂设计,国内外已开展了大量的研究工作。早期的研究,大多基于经验公式或传统的层状结构力学计算方法。由于计算模型上显而易见的缺陷,这些方法难以正确地预估沥青路面疲劳开裂寿命。事实上目前国外已广泛采用了基于断裂力学的疲劳寿命预测方法。我国也开展了相应的研究工作。但总体上国内外关于沥青混合料特性、沥青路面结构层厚度及上下结构层材料性能差异、结构层间联结状态、不同抗裂措施等因素对影响沥青路面裂缝扩展的机理研究尚不系统,也未提出合适的沥青混合料断裂韧性参数等材料性能指标以及沥青路面抗裂设计方法,有关的试验测试方法也不成熟。关于沥青路面断裂分析,应包括线弹性断裂力学分析、疲劳断裂力学分析、粘弹性断裂力学分析等几方面工作,每一方面的工作均有些问题尚需进一步深入研究。

本文作者在国内较早运用断裂力学理论与方法研究沥青路面开裂及抗裂问题,曾先后承担与沥青路面开裂有关的两项国家自然科学基金资助项目“热粘弹性断裂力学在沥青路面反射裂缝扩展机理研究中的应用”、“织物加固土作用机理研究及其在路面工程中的应用”,一项国际合作项目“热粘弹性断裂力学在沥青路面疲劳寿命预估中的应用研究”,以及包括交通部“九五”重点项目“沥青路面低温抗裂设计指标及计算方法研究”在内的十余项省部级科研项目。本书在简要地论述断裂力学知识的基础上,系统地总结了作者十多年来潜心研究的成果,包括关于沥青路面在荷载条件 and 环境因素下的线弹性断裂力学分析、疲劳断裂分析和热粘弹性断裂力学研究,以及有关沥青材料疲劳断裂性能、粘弹性能试验研究等;同时也注意吸收了国内外有价值的研究成果。内容既注重基础理论知识,又强调理论与试验相结合。其中试验研究部分占有相当比重,主要是作者近年开展的沥青混合料粘弹性试验研究成果。

全书共分八章。第一章绪论,概述沥青路面开裂形式及其成因,着重总结国内外关于沥青路面开裂研究的历史发展现状及存在的问题,最后简述目前常用的沥青路面工程抗裂措施。第二章断裂力学基础,为便于部分读者更好地理解本书内容,简要介绍了线弹性断裂力学的基本概念、原理及断裂准则。第三章沥青路面线弹性断裂分析,重点论述作者自“七五”期间以来关于沥青路面开裂机理及抗裂措施的阻裂机理的理论分析与光弹试验研究成果。第四章沥青路面疲劳断裂分析,在简要介绍疲劳断裂力学基本知识的基础上,系统总结了目前关于沥青混合料疲劳断裂性能和沥青路面疲劳断裂模型试验方法及具代表性的试验研究成果,以及相关的沥青路面疲劳断裂分析的理论成果,其中包括作者的部分研究成果。第五章沥青混合料粘弹性特性测试,在简要论述热粘弹性力学基本知识的基础上,论述了作者近年关于沥青混合料热粘弹特性的系列试验研究成果与理论分析工作,包括沥青混合料温缩应力、应力松弛特性、低温极限应力与应变、低温低频疲劳性能、温度疲劳性能、热粘弹性断裂参数等试验研究,以及多个描述沥青混合料低温疲劳性能模型的建立。第六章沥青路面温度收缩开裂粘弹性力学分

析,在概述沥青路面温度收缩开裂影响因素的基础上,论述了作者关于沥青路面温度场和沥青路面温度收缩开裂的理论研究成果。其中,通过增量型粘弹性有限元方法的建立及其应用程序的编制,计算分析了周期性变温和持续降温条件下沥青路面(含或不含基层裂缝)结构内的温度应力分布规律及其影响因素。第七章沥青路面抗裂设计,总结了当前使用的沥青路面结构抗裂设计模型,并介绍国内外道路设计规范手册中典型的沥青加铺层设计方法、具有一定代表性的基于断裂力学的抗裂分析设计方法和沥青路面低温抗裂设计方法。第八章沥青路面抗裂方法的工程应用,为指导工程实践,避免实际工作中的无序状态,参考国外经验与研究成果,总结介绍了路况调查与评价方法、各类工程抗裂措施及其施工。

本书各章既具有相对独立性,又相互紧密联系。在收集整理有关研究资料时,力求各章内容形成一个系统较完善的整体。特别注意反映沥青路面断裂分析的最新研究成果,如沥青路面疲劳断裂与粘弹性断裂分析等。在内容编排和文字处理上,尽量做到深入浅出,详略得当,既适合于从事相关领域的研究人员和技术人员切磋交流,又可供有关专业研究生学习参考。

书中所涉及的部分内容仍是大家目前关心并继续努力研究的难点问题。关于沥青路面开裂问题仍处于研究阶段,尽管已经提出了一些抗裂设计方法,但离实际应用仍存在不少差距。鉴于解决沥青路面开裂问题具有十分重要的工程意义,在撰写本书过程中,力求献给大家一本既有理论又有实践的好书,但因时间紧张,加之作者水平有限,书中的缺点和不足之处在所难免,我们恳请各位专家、学者和读者不吝指正。

作 者

2002 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 沥青路面的开裂破坏	1
第二节 沥青路面断裂分析及抗裂设计方法的发展	5
第三节 沥青路面常用的工程抗裂措施	13
第二章 断裂力学基础	15
第一节 裂纹尖端奇异场	15
第二节 应力强度因子理论	17
第三节 能量理论	24
第四节 复合型荷载作用下的线弹性断裂	28
第五节 弹塑性断裂力学	33
第三章 沥青路面线弹性断裂分析	39
第一节 线弹性断裂问题的有限元计算方法	39
第二节 半刚性基层沥青路面开裂机理	41
第三节 防止半刚性基层沥青路面反射裂缝常用措施的力学机理分析	53
第四节 沥青加铺层开裂分析	64
第五节 沥青路面开裂机理的光弹试验研究	73
第四章 沥青路面疲劳断裂分析	80
第一节 疲劳断裂力学基础	80
第二节 沥青混合料的疲劳断裂性能	82
第三节 沥青路面疲劳断裂的模拟试验	92
第四节 沥青路面疲劳断裂理论分析	104
第五章 沥青混合料粘弹性特性测试	112
第一节 粘弹性材料本构理论	112
第二节 粘弹性材料的时温等效性	122
第三节 沥青混合料低温收缩应力试验	123
第四节 沥青混合料的应力松弛试验	129
第五节 低温下沥青混合料的极限应力与极限应变	136
第六节 沥青混合料低温低频疲劳试验	139
第七节 沥青混合料的温度疲劳试验分析	145
第八节 Burgers 粘弹性模型应用于沥青混合料疲劳特性分析	150
第九节 沥青混合料热粘弹性断裂参数测试	160
第六章 沥青路面温度收缩开裂粘弹性力学分析	169
第一节 沥青路面温度收缩开裂的影响因素	170
第二节 沥青路面温度场分析	174

第三节 沥青路面温度收缩开裂的热粘弹性力学有限元方法..... 186
 第四节 周期性变温条件下沥青路面温度应力分析..... 194
 第五节 持续降温条件下沥青路面温度应力分析..... 206
 第七章 沥青路面抗裂设计..... 212
 第一节 沥青路面抗裂设计模型和结构设计..... 212
 第二节 典型的沥青加铺层设计方法..... 221
 第三节 基于断裂力学的沥青加铺层设计方法..... 226
 第四节 沥青路面低温抗裂设计..... 234
 第八章 沥青路面抗裂方法的工程应用..... 240
 第一节 影响沥青路面裂缝扩展的因素..... 240
 第二节 路面状况调查与评价..... 247
 第三节 常用的抗裂措施..... 254
 第四节 沥青路面抗裂措施的施工..... 261
 参考文献..... 269

第一章 绪 论

沥青路面开裂是世界各国沥青路面使用中均会遇到的主要病害之一,其分布十分普遍,无论是冰冻地区,还是非冰冻地区,只是各自的裂缝严重程度不同而已。根据沥青路面开裂的主要原因,裂缝可以分为两大类,即荷载型裂缝和非荷载型裂缝。

荷载型裂缝,即主要由于交通荷载作用下产生的疲劳裂缝。研究表明,荷载型裂缝的开裂方式主要体现为剪切型。非荷载型裂缝,即不是由交通荷载引起的裂缝,主要为温度型裂缝。沥青路面的温缩型开裂包括低温收缩开裂与温度疲劳开裂,均体现为张开型开裂方式。对于沥青路面基层存在裂缝情形,按沥青面层(沥青加铺层)裂缝开裂部位,又可以分为反射裂缝与对应裂缝。

根据支配裂缝产生和扩展贯穿道路结构的机理的因素不同,沥青路面裂缝存在许多不同的形态。随着公路交通建设的发展,道路工作者需要了解沥青路面裂缝的成因及机理,掌握有关的分析方法与设计方法,进行科学的研究与合理的设计,特别注意针对导致开裂的可能原因,采取恰当的减缓沥青路面开裂的工程措施。

本章简要阐述沥青路面裂缝的形态与成因^[1,2],主要介绍沥青路面断裂分析与抗裂设计方法的发展,并总结常用的沥青路面抗裂措施。

第一节 沥青路面的开裂破坏

一、裂缝的形状和几何尺寸

根据裂缝的起因、道路结构类型和破坏的发展,沥青路面裂缝可以呈现不同的形状和尺寸。

(一)排列方向

裂缝一般为纵向(平行于行车方向)或横向(垂直于行车方向)排列,斜向或曲线型排列的较少。

(二)形状

裂缝的形状往往比较直,但也有可能呈弯曲甚至曲折变化。

(三)外观

路面裂缝可能为单一的(直线型裂缝),也可能为双线、分叉或者交叉型的(图 1-1-1)。

(四)裂缝宽度

依情况不同,裂缝宽度(即裂缝两边

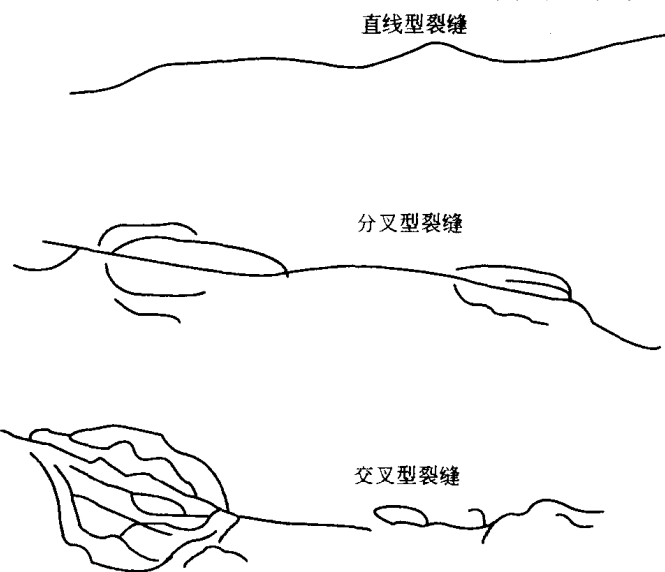


图 1-1-1 各种裂缝的外观

缘间的距离)可能相差很大。裂缝可能非常细,呈发丝状,仅十分之几毫米宽,也可能1至2mm宽,或者宽达几毫米至1cm。

(五)形式

裂缝可能为离散的,互不相联,或者相反,形成网状的块裂或龟裂(图 1-1-2)。

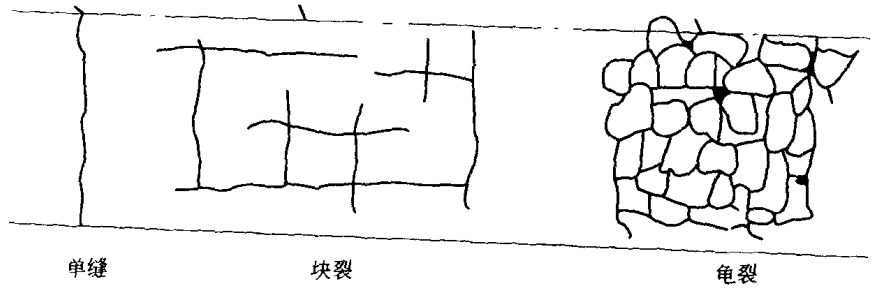


图 1-1-2 裂缝形式

二、沥青路面裂缝的成因

沥青路面开裂一般与路面材料的特性、结构组成及形式以及交通荷载和各类环境因素的作用有关。为解决沥青路面开裂的问题,必须对其成因有一正确的认识。归纳起来,引起沥青路面开裂主要有下述几方面原因:

(一)路面疲劳

由于沥青路面所承受的累计交通量超过其设计极限,将导致路面疲劳开裂裂缝。这种疲劳作用对面层甚至整个路面结构(底基层、基层和面层)均会造成影响。

对于沥青表面层(磨耗层),其疲劳裂缝很细小,且限于行车道,随时间会延伸至整个路面,形成龟裂。

用水泥处治的半刚性基层,当设计欠安全或已达到设计使用年限时,由于疲劳会产生开裂。并依材料的残余力学特性(强度、模量),大面积的块裂可能发展为小面积的块裂甚至成为龟裂。

除磨耗层外,沥青面层中其他结构层也可能由于基层的过度疲劳而易于开裂,在交通荷载的作用下裂缝将延伸至磨耗层。虽然在它们出现的初期仅局限于车辙处,但这些疲劳裂缝通常会发展为块裂。

(二)路面结构的收缩变形

当无限长的路面结构收缩时,一旦面层与下层表面间的摩擦约束力在面层内引起的拉伸应力超过其抗拉强度,就会引起面层的收缩开裂。收缩的原因,对于采用水泥材料的结构层可能是水泥的凝固变形或干缩,或者是因季节、早晚天气变化造成的温度收缩。通常收缩裂缝主要产生在至少有一层使用了水泥结合剂的结构中,但在非常恶劣的气候条件下,这种现象也影响到沥青面层。

始发于磨耗层表面的裂缝,可能因在冬天严寒条件下的温度收缩和路面结构层翘曲引起。在贫水泥混凝土基层路面上大量地观测到这种现象。在寒冷天气中,上层的温度比下层的温度低,结果因深度不同而收缩量不同,会引起路面板的翘曲。这一影响加上沥青表层温缩产生的拉伸应力,当超过材料的抗拉强度时,就产生了这种裂缝。

在冬天极度严寒的国家,沥青材料在极低温度下会硬化,这就使得它们易于因温度收缩而

开裂。当使用硬沥青和易老化的沥青时,这一现象更为常见。这时它们一般形成等距横向收缩裂缝。

对于半刚性路面,水泥稳定类基层通常没有施工缝,因此,这些结构层易于产生天然横向缩裂。这些横向裂缝贯穿磨耗层达到路表时,它们往往间距为 5~15m,且宽度随温度变化而变化,在零点几毫米到几毫米之间。缩缝在路表成为可见缝时通常为单一的直线型裂缝,但在交通荷载作用下可发展为双线型裂缝和分叉裂缝。

(三)路基土的变形

路基的变形或局部承载力的下降,也可以引起路面开裂,裂缝会贯穿路面各结构层。引起这种类型裂缝的原因各异:由于路基排水不畅使其内部含水量增加而引起承载力下降;由压缩性强的土类填筑的路基或者未经充分压实的路基,在交通荷载和路面自重作用下而缓慢下沉;路基土体滑动,尤其是沿线半挖半填路段;在旱季,粘性土由于过度失水而引起收缩,特别是道路沿线存在的树木根系会使裂缝出现得更频繁;当路面结构层形成的温度隔离效应,不足以阻止霜冻影响波及敏感土时引起路基冻胀。

路基承载力的下降和非均匀沉降将导致半刚性路面单一的纵向和横向直线型裂缝或者块裂。这些裂缝可能是细微的或者中等宽度的,且它们的边缘可以沿着破裂面错动。柔性路面中受影响区域最终将会形成龟裂。

路基土体的滑动在任何路面结构中都会产生很宽的裂缝。这些裂缝将产生滑动面,它们的边缘总是沿破裂面错开很大。

而粘性土的干缩变形将引起纵向和横向的又深又宽的直线型裂缝。

(四)设计或施工不当

路面开裂也可能因路面设计的某些缺陷,或某层或多层路面结构的施工不当而引起:

当老路拓宽时,由于基础承载力的横向变化,经常在老路边缘处出现纵向裂缝,尤其当车辆车迹主要集中在老路边缘时;

纵缝出现在道路加宽处且原有结构与加宽部分之间的施工连续性没有保证的地方,这样的裂缝通常是直线裂缝且往往相当密;

相邻车道铺筑时使用的纵缝与横向施工缝都是薄弱环节,如果施工不当且不能连续施工,这些缺陷将暴露在交通荷载作用下和温度变化中,将导致直线型裂缝,由于表面磨损和材料的损失,裂缝往往加深;

当磨耗层与下部结构层间粘结不良时,在交通荷载的作用下,它可能迅速开裂。

(五)老化和环境因素

在严冬,沥青材料最易破碎,其强度将难以承受由温缩引起的拉伸应力,可能由于路面的温缩和翘曲,在路表出现微裂缝。它可以从表面扩展至层底。这种类型的开裂可能最终发展为龟裂。但单个裂缝会一直很细小。沥青材料的老化变硬以及路表直接暴露于大气环境中,会使这种影响随时间加剧。

三、沥青加铺层的裂缝

旧路维修养护中经常采用沥青加铺层方式。由于各种因素作用,会使得旧路中原有裂缝边缘易于移动变形,这种移动将引起与裂缝对应位置的沥青加铺层顶部或底部应力集中,进而产生所谓的对应裂缝(厚沥青加铺层)或反射裂缝现象。分析沥青加铺层裂缝时,必须明确引起旧路原有裂缝边缘移动的荷载或应力,并分析相应的移动特征。

(一)引起裂缝边缘移动的荷载或应力

旧路原有裂缝边缘的移动,可能因下述三种荷载或应力引起:

交通荷载:车辆,尤其是重型车辆,靠近或经过裂缝时会朝下挤压裂缝边缘,引起裂缝边缘产生垂直和水平移动。

温度变化:昼夜及冬夏季节的温度交替变化,会导致相邻裂缝之间路面的膨胀和收缩。这些运动往往使得裂缝交替开合,有时开裂层在剧烈的温度梯度影响下可能翘曲。

土体含水量变化:路基土含水量的变化,不论是否引发开裂,往往会引起旧裂缝的开合。

(二)裂缝边缘移动特征

根据路面原有裂缝的特性和形状、裂缝边缘所承受的荷载或应力类型,裂缝边缘的移动会呈现出急剧变化的特征。

1. 裂缝边缘移动的形式

一般裂缝分为张开型裂缝、剪切型裂缝和撕裂型裂缝(见第二章)。

例如,磨损层开裂时其裂缝边缘呈现三种类型移动,如图 1-1-3 所示。

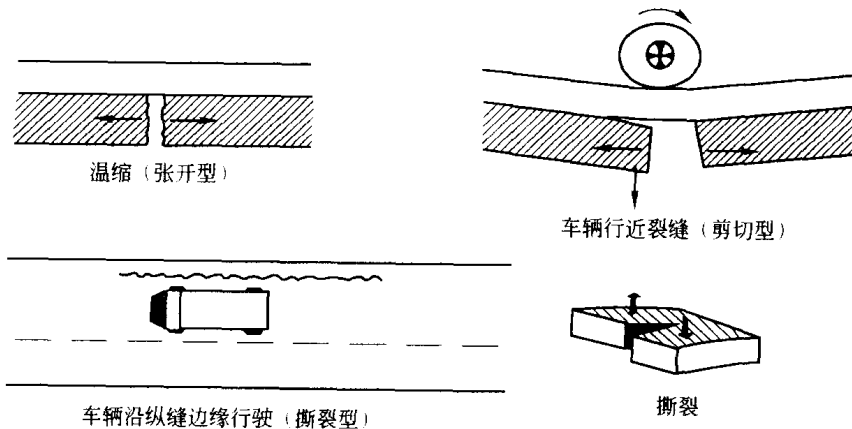


图 1-1-3 裂缝边缘可能的移动

当路面结构温缩或干缩时,常常引起张开型的裂缝边缘移动。

根据裂缝与车辆相对位置和裂缝的几何形状,行车荷载可导致裂缝边缘产生三种类型的移动。即:车辆行近横向裂缝时,将引发张开型和剪切型移动;在裂缝正上方时,裂缝边缘将以张开型移动;车辆跨纵缝行驶时将导致裂缝边缘以张开型移动;车辆沿着连续的纵向裂缝行驶将引起剪切型移动,而在纵缝端部将导致边缘以撕裂型移动。

2. 移动持续时间

各种类型荷载或应力产生的裂缝边缘移动,依裂缝边缘移动速度可分为三大类:①快速移动,由交通荷载(尤其重型交通)引起,移动的平均持续时间大约为十分之一秒;②慢速移动,由昼夜温度变化而发生的收缩引起;③缓慢移动,由季节性温度变化(温缩)或干湿变化(干缩)引起。

3. 移动幅度

交通荷载作用下裂缝边缘的移动幅度,显然为车辆轴载作用于路面的结果。它与交通荷载作用下路面结构的变形直接相关。裂缝附近的结构变形与路面整体承载能力有关,取决于结构在裂缝处能否全部或部分传递荷载应力,可以由弯沉测量估计。

温度收缩引起的裂缝边缘的移动幅度,不仅与下部结构层温度变化有关,也与材料的膨胀

系数有关。而且,这种裂缝边缘移动的幅度还随裂缝的间距和开裂层与其下部结构层的粘结质量而变化。

4. 移动频率

裂缝边缘的移动频率类似于按移动持续时间进行的分类:①行车荷载引起的移动快且频率高,大约与重载车辆的数量相一致(每天几百到几千辆);②昼夜温度变化引起的移动,通常每天发生两次;③季节性温度变化和湿度变化引起的移动,一年不过数次。

(三) 沥青加铺层反射裂缝扩展过程

旧路原有裂缝在各种荷载和应力作用下,在沥青加铺层中的发展,通常经历三个阶段:

起裂阶段,裂缝由未开裂层中已存在的缺陷引起;

稳定扩展阶段,从行车荷载或温度荷载引起的应力集中点开始向上发展并贯穿整个层厚;

破裂或最后阶段,在路表出现裂缝。

四、路面裂缝的不利影响

沥青路表出现裂缝是路况恶化的征兆,会对路面性能和耐久性产生不利的影响。这些不利影响包括:

(1) 防水性降低

路表出现任何裂缝,都会使路表水有机会进入路面结构内部,甚至进入对湿度敏感的路基土中。

(2) 引起路基过大压应力

由于存在裂缝,造成路面板体不连续,在行车荷载作用下将加大板体边缘的变形,从而在裂缝处传递过大压力至路基顶面。

(3) 增大路面应力和变形

上述的路面结构板体边缘变形,会在路面结构内(尤其基层)产生很大的应力和变形,在行车荷载作用下将缩短这些结构层的寿命。

(4) 磨耗层沿裂缝的破坏

在车辆、水分、霜冻等因素的综合作用下,磨耗层常会沿裂缝发生骨料或小块沥青的剥落。

第二节 沥青路面断裂分析及抗裂设计方法的发展

人们对沥青路面结构开裂破坏的认识是逐渐深入的。伴随着力学领域中破坏理论的研究发展,关于沥青路面结构开裂破坏研究经历了由经验性总结过渡到结合破坏力学的理论性认识过程。相应的沥青路面结构设计(特别是抗裂设计)也从经验性公式发展到半经验—半力学公式,即根据所建立的沥青路面结构开裂破坏的结构和理论模型,经过力学理论计算与分析,建立简化的理论公式或图表,结合实际工程检验与修正,最终提出比较符合实际的修正公式与相应的计算方法。在此基础上,提出相应的沥青路面抗裂设计方法。在这一过程中,也涉及到相关试验检测内容与方法、试验测试手段的变化与发展。

一、沥青路面结构破坏理论与抗裂设计方法

(一) 传统的沥青路面结构破坏理论与设计方法

自从人们在道路上开始使用沥青路面结构形式以来,就开始了对沥青路面破坏形态及其

原因的探讨,并根据当时所掌握的认识水平与方法对沥青路面结构破坏进行研究,并提出相应的抗裂设计方法。

在早期,人们主要基于对不同类型数据的调查采集,经过数据整理分析,总结提出经验性的公式与方法,计算或预测沥青路面结构相应结构破坏的使用寿命。后来随着塑性力学与传统的疲劳强度理论的发展与推广应用,关于沥青路面结构破坏的研究开始进入理性的分析阶段^[3,4]。

塑性力学在道路中的应用,主要是确保结构的承载力,即利用材料的抗剪强度指标,运用塑性破坏理论,分析道路结构层的屈服破坏,并在材料选择和结构设计上防止这种破坏的出现。如根据早期美国各州公路工作者协会(AASHTO)实施的实地性能测试结果指出了提高结构层内粘聚力的重要性。基于这种理论提出的路面结构设计方法,在确保结构承载力时,本应考虑 C 、 φ (材料抗剪强度指标中的粘聚力、内摩擦角)两方面,但在实际操作中造成了偏差,如单纯依靠改善其中的一项指标而在工程中采取不当的措施,造成不良后果。

随着传统的疲劳破坏理论的发展,人们认识到,路面的破坏是由于荷载在路面材料中引起的重复加载疲劳应力超过了路面混合料的抗拉强度而发生的。美、英、苏、前联邦德国等国,根据十多年的大量实验,相继进行了基于疲劳强度理论的设计上的重大改革。并且,目前各国沥青路面设计仍主要沿用这种疲劳强度理论^[5~10]。只是由于各国情况不同,在取得结论的方法上也各有不同,各国分别确定了自己的设计方法。

(二)基于断裂力学的沥青路面破坏理论与应用

传统的疲劳强度理论承认了由于荷载的循环作用而对材料造成的损伤的累积,但相关的分析是针对连续完整、无缺陷的结构体系进行的,并没考虑材料、结构内部先天存在的缺陷或因使用期内逐渐出现的缺陷对路面结构造成的不利影响,这使得运用传统疲劳力学理论与方法对沥青路面结构进行的计算和分析结果与实际情况存在偏差,尽管引入了不同的修正系数或安全系数,但使设计结果仍带有较大程度的不确定性。按照后来发展的断裂力学及其疲劳断裂力学的观点,结构的破坏正是由于其内部存在的缺陷引起应力集中与内部损伤,当这种应力集中与损伤累积超过材料与结构抵抗破坏的容许值时,就造成了内部缺陷的发展,并导致结构的破坏。断裂力学及其疲劳断裂力学在工程上的应用与发展,引起或即将引起有关结构设计的革命性变革,包括其中的设计理念、计算方法、设计和验算指标等方面。

基于结构内部存在裂缝之类缺陷的断裂力学理论与方法在沥青路面工程中的应用,大约开始于20世纪60年代末、70年代初^[11,12],至今为止,依次经历了线弹性断裂力学、疲劳断裂力学与粘弹性断裂力学等几类断裂力学理论与方法的应用发展阶段。

1. 线弹性断裂力学

关于路面结构内部存在缺陷的沥青路面结构分析,有一种处理方法,即认为裂缝总是有一定宽度,裂缝尖端曲率并不为零,考虑接缝处存在应力集中现象,按照传统的强度理论进行计算。如1980年,Monismith等人^[13,14]用热弹性力学,对交通荷载与温度荷载作用下的开裂基层(或旧路面)与加铺层中的应力分布特征进行了研究,并就橡胶沥青夹层对于裂缝尖端附近应力集中的消散作用进行了分析。结果表明,软弱夹层能有效地降低裂缝顶端的应力集中,延缓反射裂缝的扩展。为了寻求合适的夹层材料以阻止或延缓反射裂缝的扩展,Coetzee、Franken、Marchard等人^[15~24]均作过类似的分析,Franken的研究表明,夹层材料的刚度越大,止裂作用越明显,如果层间的粘结强度不高,有可能使得基层或旧路面上的裂缝沿界面扩展,但如果层间粘结强度足够高,不会导致脱胶现象发生,则裂缝将会沿垂直方向扩展。

此外,Seeds^[25]等人将降温过程中旧水泥路面缝边的张开位移作为主要特征参数,通过力学分析提出了一种计算温度收缩引起的加铺层中的应力响应,并开发了相关的计算机程序,可进行加铺层的设计及温缩型反射裂缝疲劳寿命的预估。

严格意义上的线弹性断裂力学,是针对裂缝尖端曲率半径为零、宏观可检的裂缝,准确地描述裂缝尖端应力应变场,通过断裂准则计算临界裂缝尺寸或临界荷载,并建立裂缝起裂和稳定扩展条件及其计算方法。线弹性断裂力学在沥青路面结构开裂破坏分析中的应用,主要贡献在于,通过其应用,计算分析了沥青路面在交通荷载和温度荷载下的开裂机理及各类防裂措施阻止沥青路面开裂的原理,并引入应力强度因子、能量释放率及相应的断裂韧性参数等概念,提供了人们科学认识沥青路面开裂的方法与手段(包括计算参数及开裂判断准则)。

研究工作主要集中在两方面:通过各种试验测试,分析阻裂措施防止开裂的机理,对比不同阻裂措施的效果^[27~34];建立力学模型和结构模型,通过数值计算分析沥青路面的开裂机理或阻裂措施的机理^[30,35~45]。其中重点在软弱夹层、应力吸收薄膜(SAMIS)、土工布、格栅等夹层体系阻止沥青路面开裂的效果及数值模拟分析方面。特别对于夹层体系,其性能与层间接触状态存在很大关系,如何科学合理地考察层间接触状态对沥青加铺层开裂的影响,是相关试验技术和数值模拟技术的核心。

“七五”期间,为了迎接我国即将兴起的高等级公路建设高潮,国家组织开展了有关沥青路面的重点科技攻关项目“高等级公路半刚性基层沥青路面结构设计和抗滑表层的研究”(编号75-24-01-01)。为了了解交通荷载和温度荷载作用下半刚性基层裂缝扩展规律以及阻裂措施机理,长沙交通学院利用线弹性断裂力学理论与方法,结合光弹模型试验,进行了较系统的研究。后来,继续开展了相关研究工作,取得了一系列的研究成果^[2,30~45]。主要结论有:

1)对于交通荷载的作用,大量常用沥青路面结构开裂主要取决于剪应力集中作用,属于剪切型开裂。而对于温度荷载,如果降温梯度较大,或降温速度较快,在沥青面层顶面产生的温度应力比较大,有时比交通荷载应力大几倍,容易导致沥青面层表面开裂。此时一般表现为横向裂缝。

2)对于开裂的半刚性基层沥青路面,当沥青面层较厚(厚度 $\geq 12\text{cm}$ 时),路面降温时最大的温度应力发生在面层表面,易于形成对应裂缝。当沥青面层较薄(厚度 $< 9\text{cm}$)时,情况有所不同,一般为反射型裂缝。

3)关于裂缝的防治,沥青面层较厚时,主要选用优质沥青和配置抗裂性能好的沥青面层混合料。沥青面层较薄时,除选用优质沥青外,还应采取一些防裂措施,如在面层和半刚性基层之间设置土工织物或做一层弹性模量低、抗拉性能好的橡胶沥青应力吸收膜,也可在面层和开裂半刚性基层之间铺设级配碎石中间层,但其厚度不小于 10cm 。

4)粒料过渡层、橡胶沥青、土工布、玻璃纤维格栅等夹层材料在防止反射裂缝时所发挥的力学效应主要包括:软弱夹层作用(应力吸收薄膜);桥联作用;嵌锁咬合作用。此外,土工布还可起到隔离作用,防止路表开裂后路表水的下渗。

5)各种夹层体系之类措施的阻裂效果与其层间接触状态、夹层材料的模量等存在很大关系,在选择土工织物、格栅等不同类型夹层材料时,应研究其力学指标能否保证其加筋或应力吸收薄膜效果的发挥。

2. 疲劳断裂力学

目前,关于沥青路面结构开裂研究领域主要集中在应用疲劳断裂力学理论与方法。

由于沥青路面结构始终处在交通荷载和温度荷载的循环作用下,其破坏主要体现为疲劳

破坏特征,因此,应主要研究沥青路面内裂缝的疲劳扩展规律。现在,人们已公认,沥青路面结构的疲劳破坏可以分为两个阶段,即传统的无缺陷的疲劳起裂阶段及其后考虑裂缝的疲劳断裂阶段。关于前者,人们已经做了大量的疲劳破坏试验与结构分析,积累了相当多的经验,其所得成果至今仍在沥青路面结构设计方法中沿用。而关于后者,主要围绕疲劳断裂规律性展开研究。其中牵涉到材料的疲劳断裂规律的数学模型的建立及其描述,模型参数的测试与确定,沥青路面结构疲劳断裂分析与结构简化模型的建立及相关计算方法,以及各类影响因素及其对模型与计算方法的影响修正等。

关于沥青混合料和沥青路面疲劳断裂破坏过程的描述,有的采用应力或应变或荷载等力学参量,用它们与循环加载次数的回归关系作为相应的疲劳方程^[46~49]。

但人们^[50~53]普遍采用基于应力强度因子的经验性总结的 Paris 公式,见式(1-2-1),描述沥青路面疲劳裂缝扩展过程,并以此计算疲劳裂缝扩展寿命。根据理论分析结果和疲劳断裂试验数据,提出沥青路面(含沥青加铺层)结构的使用寿命预测方法。

$$da/dN = A(\Delta K)^n \quad (1-2-1)$$

式中: da/dN ——裂缝随荷载循环次数的扩展速率;

ΔK ——荷载循环过程中裂缝应力强度因子的变化值;

A, n ——材料参数。

为了研究沥青混合料及沥青路面的疲劳断裂规律,人们采用了不同的试验方法(直接拉伸试验、间接拉伸试验、四点弯拉试验、三点弯拉试验和半圆试件弯拉试验等)测试沥青混合料疲劳断裂性能,并进行了不同的模拟交通荷载、温度荷载或二者共同作用的沥青路面模型的疲劳断裂试验。随着试验研究工作的积累,人们发现,在交通荷载和温度荷载的作用下,沥青路面结构内裂缝扩展的形式复杂,一般为复合型裂缝^[54],用 Paris 公式这种基于张开型裂缝疲劳试验获得的规律性认识模型与实际情况存在偏差,主要体现在模型中描述疲劳裂缝扩展速率的公式中所包含的项数及其相关模型参数上。

由于沥青材料具有较强的温度敏感性,具有热粘弹性材料特征,研究发现,用 Schapery 理论研究沥青混合料及其结构的疲劳裂缝扩展过程比较准确^[55,56]。这一理论仍沿用 Paris 公式,只是利用沥青材料的粘弹性特性预测 Paris 公式中的 A, n 两个材料参数值。后来,人们在此基础上,经过采用不同的试验方法针对不同沥青混合料开展疲劳断裂试验,提出了 Schapery 理论中计算疲劳断裂参数的修正公式^[1,57,58]。有关内容见第四章第二节。

利用疲劳断裂力学方法分析沥青路面疲劳开裂,可以获得有价值的结论^[57,59~64],用于指导工程实际或有助于沥青加铺层设计公式的提出^[57,65~70]。

由于沥青混合料性质的复杂性,至今关于沥青混合料及沥青路面疲劳断裂的研究仍在进行中,欲提出成熟的抗裂设计方法尚存在较大的差距。

3. 粘弹性断裂力学

人们早就认识到沥青混合料为一种粘弹性材料,已经开展了不少关于沥青材料的粘弹性分析工作。由于沥青材料属于一种粘弹性材料,沥青路面开裂主要为温度型开裂,因此,大量的粘弹性力学研究工作主要围绕沥青路面温度型开裂开展(见本节“二、沥青路面的温度型开裂”)。但基于断裂力学的粘弹性力学方面的应用研究是近些年开始发展起来的。研究工作主要集中在沥青材料的粘弹性特性及低温抗裂指标的试验研究及沥青路面温度应力计算方面,应用粘弹性断裂力学理论与方法进行理论分析方面的工作尚不多。

值得注意的是,试验研究表明,在对沥青混合料和沥青路面结构进行疲劳断裂力学与粘弹

性断裂力学分析时,应用能量观点预测沥青混合物和沥青路面疲劳断裂寿命似乎更为准确。

最近,有部分学者与研究部门开始重新应用疲劳损伤力学分析沥青路面疲劳破坏。以前应用疲劳力学理论时,是基于 Miner 线性累积损伤理论,认为沥青材料损伤过程中疲劳损伤参数不变化。而实际上,沥青混合物属于一种记忆型材料,其受力变形历史肯定对其即时力学特性及力学响应存在影响,不同的荷载施加历史会产生不同的损伤影响,即体现出损伤的非线性叠加特征。并且沥青属于高分子材料,在使用中暴露在自然环境下,存在老化现象,将使沥青混合物疲劳损伤所涉及的力学性能参数发生变化,这必然对其疲劳损伤过程造成不利的影响。因此,必须开展关于沥青混合物及沥青路面结构的疲劳损伤破坏研究。

二、沥青路面的温度型开裂

随着人们对沥青路面结构开裂问题研究工作的深入,认识到交通荷载导致沥青路面的开裂体现为剪切型开裂,但更主要的是温度等非荷载型因素引起沥青路面的收缩张开型开裂。因此,现在研究重点是沥青路面的温缩型裂缝。

关于因温度变化引起的沥青路面开裂问题的研究始于 20 世纪 60 年代,但直到今天国内外工程界仍然十分关注这个领域的研究与发展。从已有的成果来看,早期的工作主要集中在低温开裂方面,重点是温度应力的计算方法以及沥青混合物低温抗裂性能的试验研究。20 世纪 80 年代后期至 90 年代初期,许多国家致力于旧路改造方面的工作,因此,温缩型反射裂缝的研究受到了前所未有的重视。美国公路战略研究计划启动后,将温度变化引起的沥青路面开裂问题的研究全面推进到了一个新的阶段。在该计划中,对于温度应力的测定、温度开裂的预估、试验与分析仪器的开发以及低温开裂和温度疲劳开裂等方面的问题进行了广泛的研究和推广应用;目前,正在致力于开发应用这些方法与手段对沥青混合物的低温开裂与温度疲劳开裂的有关性能进行评价的分析系统。

(一)低温开裂

1. 温度收缩应力计算模型与方法

到目前为止,在温度应力的计算方面影响最为深远的研究应首推 Hills 和 Brien 的工作^[71]。他们假设路面为一无限长的受约束条带,采用准弹性梁的力学模型提出了著名的路面温度应力近似计算公式:

$$\sigma(T_f) = \sum_{T_0}^{T_f} \alpha(T) S(\Delta t, T) \Delta T \quad (1-2-2)$$

式中: $\sigma(T_f)$ ——表示在一定的降温速度下,温度从 T_0 降至 T_f 时的累计温度应力;

$\alpha(T)$ ——表示沥青混合物随温度 T 而变化的温度收缩系数;

T_0 ——初始温度;

T_f ——降温终了时的温度;

$S(\Delta t, T)$ ——表示温度为 T , 加载时间为 Δt 时,沥青混合料的劲度模量;

ΔT ——表示对变温过程进行离散时的温度间隔。

尽管式(1-2-2)对沥青路面温度应力的计算作出了重要贡献,但所存在的理论性上的不足也是不容忽视的,其中,最根本的问题是式(1-2-2)所采用劲度模量的概念实际上是一种蠕变试验的割线模量,将其用作表征沥青混合材料的应力应变关系是一种准弹性假定,而事实上沥青混合材料是一种热粘弹性材料,温度应力在其产生与发展的过程中必然存在应力松弛现象,式(1-2-2)无法考虑这一因素,必然会对温度应力的计算结果产生一定的影响。

鉴于上述原因,加之随着研究工作的不断深入,人们对于沥青混合材料热粘弹性本构关系的定量描述也越来越准确。国内外学者进行的大量研究^[72~75],发现在低温状态下沥青混合料的粘弹性本构关系可以用 Burgers 模型表征;也有些采用广义 Maxwell 模型描述。文献[76]对时间—温度的相关性进行了研究,结果表明,沥青混合料在相当宽的温度范围内均表现出热流变简单材料的特征,并提出了著名的 WLF 公式,用以计算表征沥青混合料时间—温度转换关系的移位因子 a_T 。文献[77]则在文献[78]的基础上提出了计算移位因子的另一种数学形式,即 Arrhenius 公式。

温度收缩系数亦是温度收缩应力计算的重要参数,为此,不少学者对沥青混合料的温度收缩系数进行了试验研究^[79~83]。

2. 低温开裂判据

目前,关于沥青路面低温开裂的判断,主要采用低温开裂温度。到目前为止,在进行低温开裂温度预估的研究中,大多数温度开裂的判据建立在一个简单的概念上,即认为当降温引起的温度应力上升到沥青混合料的抗拉强度时,路面便会发生低温开裂^[84~87]。虽然近年来,许多研究都采用模拟沥青混合料粘弹性特性的方法进行降温过程温度应力的计算及路面开裂温度的预估^[88~90],而且在表征沥青混合料粘弹性响应的数学模型上各有差异,但本质上都是通过温度应力与抗拉强度的比较来定义低温开裂破坏。

低温开裂温度的预估方法可以分为两大类,第一类称之为间接预估法,第二类称之为直接预估法。

间接预估法是指按照路面中计算所得温度收缩应力与沥青混合料抗拉强度相等时路面就会产生低温开裂的假说,估计低温开裂温度的方法。如利用公式(1-2-2)计算沥青路面温度应力,再与试验测定的沥青混合料随温度变化的抗拉强度进行对比。

直接预估法则是通过室内试验直接测定沥青混合料的低温开裂温度,并以此作为预估沥青路面低温开裂的方法。文献[91]的试验结果表明,沥青混合料的开裂温度一般在 $-25^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ 之间,并且发现,开裂温度和沥青混合料的老化、脆化程度及流变特性密切相关。试验研究还对三种降温速度($5^{\circ}\text{C}/\text{h}$, $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$, $27^{\circ}\text{C}/\text{h}$)下的开裂温度进行了比较,结果发现,三种降温速度对开裂温度几乎没有影响。但 Ruth 的研究^[90]表明只有当降温速度高于 $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 时,降温速度对开裂温度的影响不显著,当速度低于 $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 时,降温速度的影响还是不可忽视的。此外,还有人对温度变化历史的影响进行了相应的研究。研究结果表明,变温历史对断裂温度的影响不显著。

在分析已有的关于沥青路面低温开裂温度直接预估法的研究成果时,SHRP 的工作是不容忽视的^[92~95]。在 SHRP 的研究中,不仅研制了能模拟不同降温过程、有较高试验精度的约束试件温度应力实验仪(TSRST),规范了相应的实验方法,并且开发了全套实验数据处理与分析软件,进行了大量的实验验证。因此,如果采用直接法进行沥青路面开裂温度的预估,TSRST 试验是最为可靠的方法。有的研究人员利用 TSRST 进行试验,获得了理想的研究结果^[96,97]。有的根据其试验结果,提出了低温开裂预测模型^[98]。

尽管大多数的研究认为应以沥青和沥青混合料的极限强度作为低温开裂破坏的惟一判据^[89,99,100],但亦有不少的研究成果显示,沥青和沥青混合料的破坏应变相对于破坏应力而言,对于温度和变温速度的影响要敏感得多,因此,以破坏应变作为低温开裂的判据更为合理,至少在进行低温开裂预估时应将其放在与极限强度同等重要的位置。然而,值得注意的是,破坏应变只能通过荷载试验测定,而无法通过模拟路面降温过程测得。可能这就是大多数文献都